

RE-123 マルチフィラメント線材におけるフィラメントごとの局所臨界電流分布が電流容量に与える影響

Influence of Spatial Variation of Local Critical Currents in Each Filament on Current Capacity of RE-123 Multi-filamentary Coated Conductor

東川 甲平, 井上 昌睦 (九大); 藤田 真司, 飯島 康裕 (フジクラ); 木須 隆暢 (九大)

HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.); FUJITA Shinji, IJIMA Yasuhiro (Fujikura); KISS Takanobu (Kyushu Univ.)

E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

RE-123 線材のマルチフィラメント化は、マグネット応用における磁界分布の空間均一性や時間安定性の担保に有望なコンセプトであると期待されている。一方、フィラメントを細くするほどこの効果は顕著となるが、フィラメントの I_c 分布は線材内の局所欠陥の影響を受けやすくなるため電流容量に悪影響を与えることが懸念される。そのような中、安定化材等によりフィラメント間に電氣的結合を有するマルチフィラメント線材は、その双方の解決策として期待されている。そこで本研究では、電氣的な結合を有する長尺 RE-123 マルチフィラメント線材に対してフィラメントごとの局所臨界電流分布の評価を行い、大域的な電流容量との関係を議論する。

2. 方法

対象とした試料は、4 mm 幅 4 分割のマルチフィラメント線材である。その概略を Fig. 1 に示す。本線材は超伝導層の製膜前にバッファ層を傷つける手法によって作製されたものであり、四端子法によって評価された臨界電流 (I_c) も長尺にわたって高い値を示している^[1]。前回の報告では、リール式走査型ホール素子顕微鏡 (RTR-SHPM) により 113 m 長の試料のフィラメントごとの I_c 分布を評価した^[2]。今回は、Fig. 2 に示す比較的 low 特性部が集中していた 5 m 長を対象に、各フィラメントの局所抵抗を筆者等の解析モデルで記述すると共にフィラメント間抵抗を与えて分布定数回路を構成し、各フィラメントにおける局所的な電流分流入らびに電界発生を計算することによって、フィラメント全体でのマクロな臨界電流を導出した。

3. 考察

その解析結果を Fig. 3 に示す。なお、本解析は液体窒素中、自己磁界での特性を評価している。まず、フィラメント間に電氣的に結合がない場合は、平均電界が $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ となる大域的な臨界電流は 132 A と見積もられ、隣接フィラメントへの電流の迂回が許されないため、低特性部で局所的に大きな電

界を発生していることがわかる。このフィラメント間抵抗が小さくなるにつれ、低特性部での電流の迂回が許容され、大域的な臨界電流が理想的には 200 A まで向上するばかりではなく、局所高電界部が大幅に抑制されていることがわかる。このような検討により、応用時に許容される磁化や局所発熱から、線材の空間均一性・フィラメント分割数・フィラメント間抵抗への要求が定量的に整理できるものと期待できる。

謝辞 本研究は、日本学術振興会の科研費 (16H02334, 16K14216) の助成を得て行ったものである。

参考文献

- [1] C. Kurihara et al., Physica C 530 (2016) 68.
- [2] K. Higashikawa et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. (2017) 6603004.

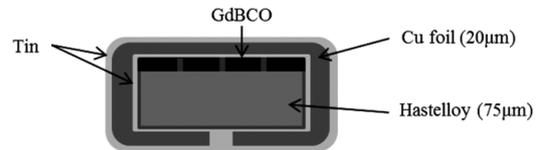


Fig. 1. Schematic diagram of the multi-filamentary RE-123 coated conductor^[1].

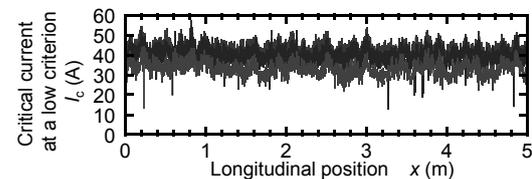


Fig. 2. Local critical current distribution at a low electric field criterion in a 5-m-long section of the multi-filamentary coated conductor characterized by RTR-SHPM^[2]. Each color indicates the distribution for each filament.

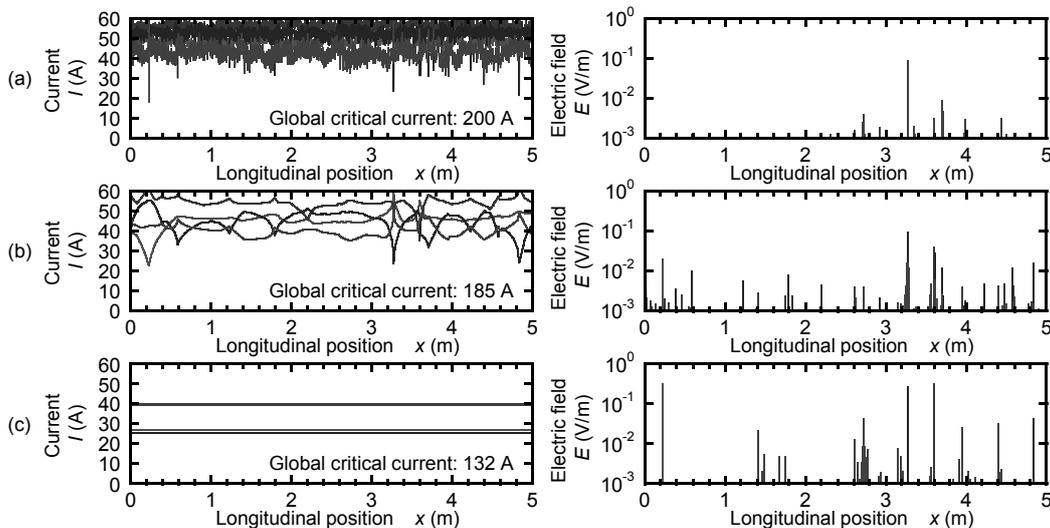


Fig. 3. Current distribution and electric field distribution in 5-m-long section of the multi-filamentary coated conductor where averaged electric field becomes $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ for various inter-filament resistances of (a) $0 \Omega/\text{m}$, (b) $10^{-7} \Omega/\text{m}$, and (c) $\infty \Omega/\text{m}$. Each color indicates the distribution for each filament.

リール式磁気顕微鏡を用いた長尺 RE-123 線材の 局所臨界電流分布評価における解析手法と誤差に関する検討

Influence of Analysis Method on Local Critical Current Distribution in Long RE-123 Coated Conductor Characterized by Reel-to-reel Magnetic Microscopy

辻野 大樹, 福崎 貴裕, 東川 甲平, 鈴木 匠, 井上 昌睦 (九州大学);

五十嵐 光則, 柿本 一臣, 飯島 康裕 (フジクラ); 木須 隆暢 (九州大学)

TSUJINO Daiki, FUKUZAKI Takahiro, HIGASHIKAWA Kohei, SUZUKI Takumi, INOUE Masayoshi (Kyushu-University);

IGARASHI Mitsunori, KAKIMOTO Kazuomi, IJIMA Yasuhiro (Fujikura); KISS Takanobu (Kyushu-University)

E-mail: d.tsujino@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

RE-123 線材は、磁界中の優れた臨界電流特性によりマグネット応用に期待されており、実用のためには、その電流電圧特性を把握することが重要である。前回の報告では、非破壊的かつ高分解能で長手方向の局所 I_c 分布を評価可能な磁気的手法による情報を基に、大域的な $I-V$ 特性を導出するマルチスケールモデルを提案した^[1]。一方、四端子法による実測との比較の結果、特に局所的に I_c の低下が大きな領域で乖離が大きくなった^[1]。そこで本研究では、これが磁気的手法による局所 I_c 導出手法に起因する問題と考え、3通りの解析手法を検討し、それらの妥当性を検証した。

2. 実験・解析方法

5 mm 幅の GdBCO 線材に対して、リール式走査型ホール素子顕微鏡 (RtR-SHPM) を用いて二次元の残留磁界分布を取得し、長さ方向分解能 420 ミクロンごとの局所 I_c 分布を求めた。この時、残留磁界分布から局所 I_c 分布を求める解析方法として、(a)有効線幅と I_c 値をパラメータとし、電流分布そのものは臨界状態モデルを仮定して順問題による局所 I_c の導出、(b)Biot-Savart 則の逆問題により支配成分である長手方向の電流成分のみを考慮した解析、(c) Biot-Savart 則の逆問題により長手方向と幅方向の成分を考慮した二次元的解析、の 3通りを検討した。また、この局所 I_c 分布が線材の有効断面積の揺らぎによるものと考え^[1]、パーコレーション遷移モデルに基づき大域的な $I-V$ 特性を 10 mm 長ごとに導出した。これらの結果を、直流四端子法による $I-V$ 特性測定結果と比較した。

3. 実験結果、考察

それぞれの解析で評価した局所 I_c 分布を Fig. 1 に、その結果を基に $I-V$ 特性の評価を行った結果を Fig. 2 に示す。局所 I_c が高く健全な領域では、それぞれの解析結果は、解析方法の違いによらず、四端子法の結果をよく記述できている。しかし、局所 I_c が 25%程度低下している領域について、(a)、(b)の解析方法では、モデルの結果と四端子法の結果では大きな乖離があり、(c)の解析方法では、両者が定量的に一致することが分かった。局所的に顕著な欠陥がある領域で

は、欠陥を迂回する電流成分が大きくなるため、幅方向成分を考慮することにより、正確な局所 I_c が得られる。このため、解析結果が実験結果を定量的に記述できると考えられる。以上のとおり、2 次元的な解析に耐え得る磁気像の取得と適切な解析手法の採用により、簡便な磁気的手法によって得られる情報のみから大域的な $I-V$ 特性を定量的に評価できることが明らかとなった。本知見は、線材評価における標準化に大きく資する情報であるとともに、マグネット応用で重要であるにも関わらず直接測定することが困難な長尺線材の $I-V$ 特性の評価に、大きな力を発揮するものと期待できる。

参考文献

1. T. Suzuki, *et al.*: Abstracts of 1st Asian ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference, (2016) p.183

謝辞

本研究は、日本学術振興会の科研費 (16H02334) の助成事業及び、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業の結果得られたものである。

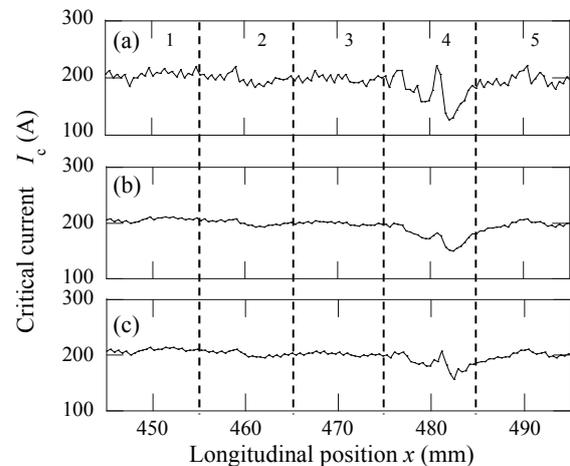


Fig. 1 Local I_c distribution by three methods: (a) critical state model, (b) inverse problem of Biot-Savart law (J_x), (c) inverse problem of Biot-Savart law (J_x and J_y).

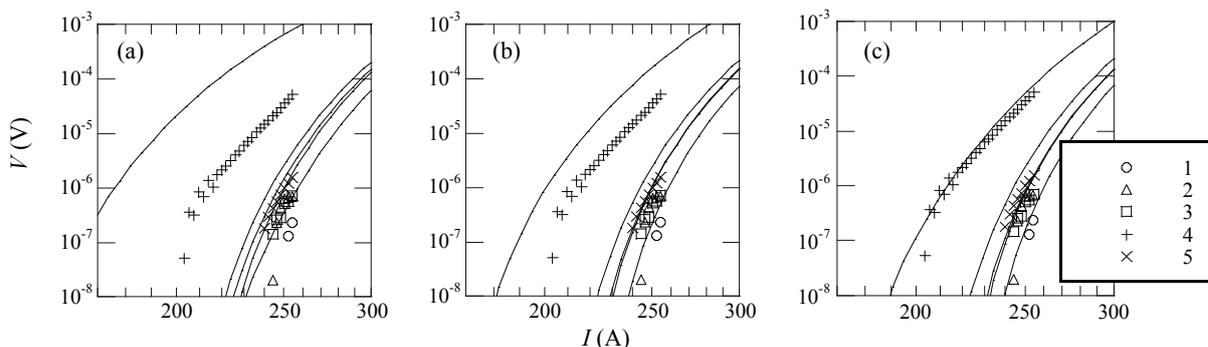


Fig. 2 Comparison with theoretical curves by three methods and experiments: (a) critical state model, (b) inverse problem of Biot-Savart law (J_x), (c) inverse problem of Biot-Savart law (J_x and J_y).

サブクール液体窒素温度下における長尺 RE-123 線材の 磁界中局所臨界電流分布の評価

Characterization of In-field Local Critical Current Distribution in Long RE-123 Coated Conductor at Subcooled Liquid Nitrogen Temperature

野田 将平, 福崎 貴裕, 東川 甲平, 鈴木 匠, 井上 昌睦 (九州大学);
五十嵐 光則, 柿本 一臣, 飯島 康裕 (フジクラ); 木須 隆暢 (九州大学)

NODA Shohei, FUKUZAKI Takahiro, HIGASHIKAWA Kohei, SUZUKI Takumi, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.);
IGARASHI Mitsunori, KAKIMOTO Kazuomi, IJIMA Yasuhiro (Fujikura Ltd.); KISS Takanobu (Kyushu Univ.)

E-mail: s.noda@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

RE-123 線材における局所臨界電流分布の空間均一性は、機器設計上の重要な指標として認知されている。一方、長尺線材の評価は一般的に 77 K の自己磁界に近い低磁界環境において行われており、機器応用時に重要となる磁界中や他の温度における状況は明らかとなっていなかった。そこで、本研究では、これまでに報告しているリール式磁界中連続磁化計測システム^[1]に、さらにサブクール液体窒素循環システムを組み合わせることにより、長尺 RE-123 線材の局所臨界電流分布の外部磁界依存性と温度依存性の評価を行った。

2. 実験

5 mm 幅の GdBCO 線材をリール式線材搬送機構によって長さ方向に搬送し、冷媒中の磁界印加部で磁化された線材の磁界分布をホールセンサで取得した。それぞれの長手方向位置において得られた磁界分布から臨界電流密度で流れる磁化電流を評価し、その大きさを臨界電流として評価した。なお、磁界の印加には 5 T まで印加可能な超伝導マグネットを使用した。また、冷媒の供給はサブクール液体窒素循環システムを使用し、77 K のみならず 65 K での測定を行った。

3. 結果・考察

5 mm 幅の GdBCO 線材に対して、サブクール液体窒素温度 65 K において得られた各印加磁界での I_c 分布を Fig. 1 に示す。このように従来では得られずかつ実用上も重要な 65 K

という温度において長尺線材の局所 I_c 分布の評価に初めて成功した。印加磁界が大きくなるにつれ I_c 値が低くなっており、また I_c 分布の特性低下部の位置は各印加磁界で一致していることが分かる。また、この局所 I_c 値を平均値で規格化した I_c 分布を Fig. 2 に示す。印加した外部磁界に依らずほぼ同じ空間分布になっていることがわかる。以上により、長尺 RE-123 線材において局所 I_c の空間分布に大きな外部磁界依存性がないことがわかった。また、77 K においても得られた I_c 分布を同様に規格化したものを Fig. 3 に示す。こちらにおいても外部磁界に依らずほぼ同じ空間分布になっていることがわかる。さらに、Fig. 2 と Fig. 3 を比較するとほぼ同じ空間分布になっていることがわかり、局所 I_c の空間分布に大きな温度依存性が見られないことがわかる。このように、PLD 法によって作製された本試料の局所 I_c の空間分布には外部磁界依存性、温度依存性がほぼ見られず、局所 I_c の温度磁界依存性と長さ方向依存性は独立に議論できることが明らかとなった。

参考文献

- [1] K. Higashikawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.83.

謝辞

本研究は、日本学術振興会の科研費(16H02334)の助成事業及び、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業の結果得られたものである。

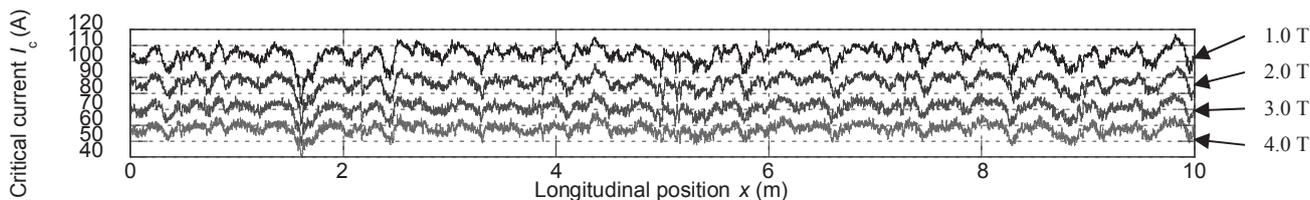


Fig. 1. Longitudinal distributions of local critical currents estimated for different external magnetic field conditions at 65 K.

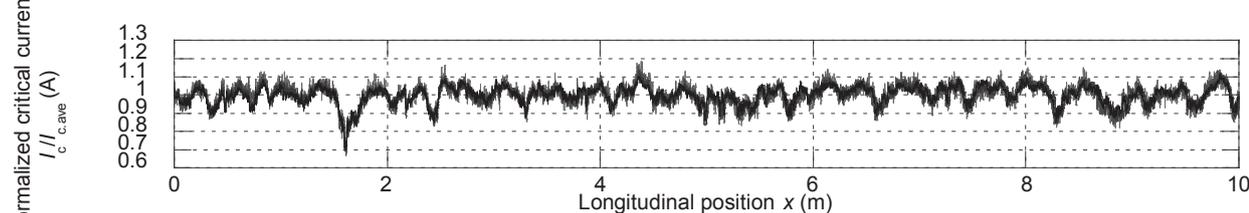


Fig. 2. Longitudinal distributions of Normalized critical currents estimated for different external magnetic field conditions at 65 K.

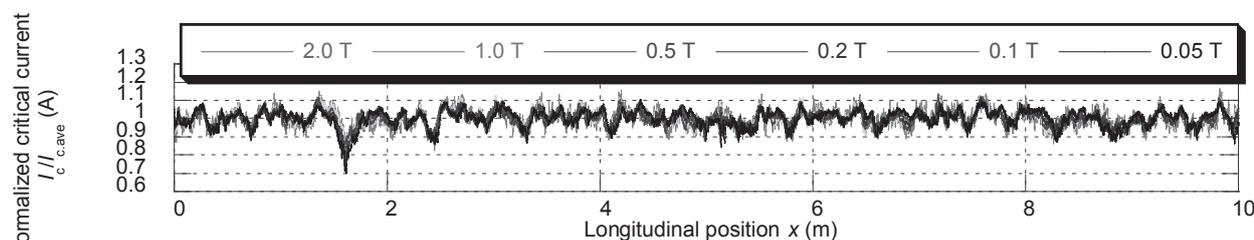


Fig. 3. Longitudinal distributions of Normalized critical currents estimated for different external magnetic field conditions at 77 K.

ハイブリッド顕微法を用いた Roebel 導体用素線の電流制限因子の解明

Clarification of Current Limiting Obstacles in Roebel Strands Based on Hybrid Microscopy

西宮 悠平, 郭 翔, 東川 甲平, 井上 昌睦(九大);

JIANG Zhenan, BADCOCK Rodney, LONG Nicholas, BUCKLEY Robert (Victoria University of Wellington);
木須 隆暢(九大)

NISHIMIYA Yuhei, GUO Xiang, HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.);

JIANG Zhenan, BADCOCK Rodney, LONG Nicholas, BUCKLEY Robert (Victoria University of Wellington);
KISS Takanobu (Kyushu Univ.)

E-mail: y.nishimiya@pse.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

RE-123 線材を用いた大電流容量導体として、ミアンダ形状の素線を転位して積層した構造を有する Roebel 導体があり、様々な機器応用が期待されている。その素線形成には、パンチング加工による信頼度の高い加工技術の確立が求められる。しかしながら、従来の評価手法では、本質的に 2 次元の構造を有する Roebel 導体素線における臨界電流密度 J_c の面内分布の評価は困難であった。そこで本研究では、2 次元の J_c 分布の評価が可能なリール式走査型ホール素子顕微鏡 (RTR-SHPM) 及び 3 次元の微細構造観察が可能な X 線マイクロ CT から成るハイブリッド顕微法を用いて、メートル級素線の均一性評価を実施し、欠陥を検知すると共に、その場観察によって欠陥組織を明らかにし、素線加工時のプロセス条件との対応を考察して、電流制限因子の解明、加工技術改善の為の有用な情報の取得を目指した。

2. 方法

測定対象とした試料は、2 mm 幅の Roebel 導体素線である。まず、RTR-SHPM を用いて 2 次元の残留磁界分布を測定し、Biot-Savart 則の逆問題を解くことでシート電流密度ベクトルの 2 次元分布に変換した後、シート電流密度の大きさ $|J|$ 分布を取得した。次に、 $|J|$ 分布から確認された特性低下箇所に着目し、X 線マイクロ CT を用いて、測定分解能 $0.96 \mu\text{m}$ で構造観察を行った。

3. ハイブリッド顕微法を用いた電流制限因子の解明

取得した $|J|$ 分布の一部を Fig. 1(a) に示す。2 次元的な計測と 2 次元的な解析により、試料形状に沿ったシート電流密度の変化する様子を明確に確認することができる。また、矢印で示すように、直線部から転位部への遷移領域に、周期的な欠陥の存在を確認することに成功している。この結果を元に、本研究では、(a) 内に示した特性低下箇所 A、特性良好箇所 B について構造観察を行った。Fig. 1(b), (c) は、特性低下箇所 A、B に対応する、線材の厚さ方向における超伝導層付近を観察した結果ならびに線材長手方向に $400 \mu\text{m}$ ごとに断面構造を観察した結果である。画像内の番号は、観察した断面箇所と界面上での位置の対応を示している。Fig. 1(b) の界面画像からは、破線箇所において、B には確認できない X 線吸収率が変化している様子を確認できる。また、それに対応する断面構造の変化を、実線部分のように観察しており、Fig. 1(c) の観察結果と比べると線材幅方向端部に特徴的な構造が見られる。

以上のように、本手法によれば長尺 Roebel 素線中の欠陥検出と欠陥のピンポイント構造観察が可能であり、Roebel 素線加工プロセスへの効果的なフィードバックが可能になる。従って、本手法は信頼性の高い Roebel 素線実現のために極めて有効であると考えられる。詳細な考察は当日に報告する。

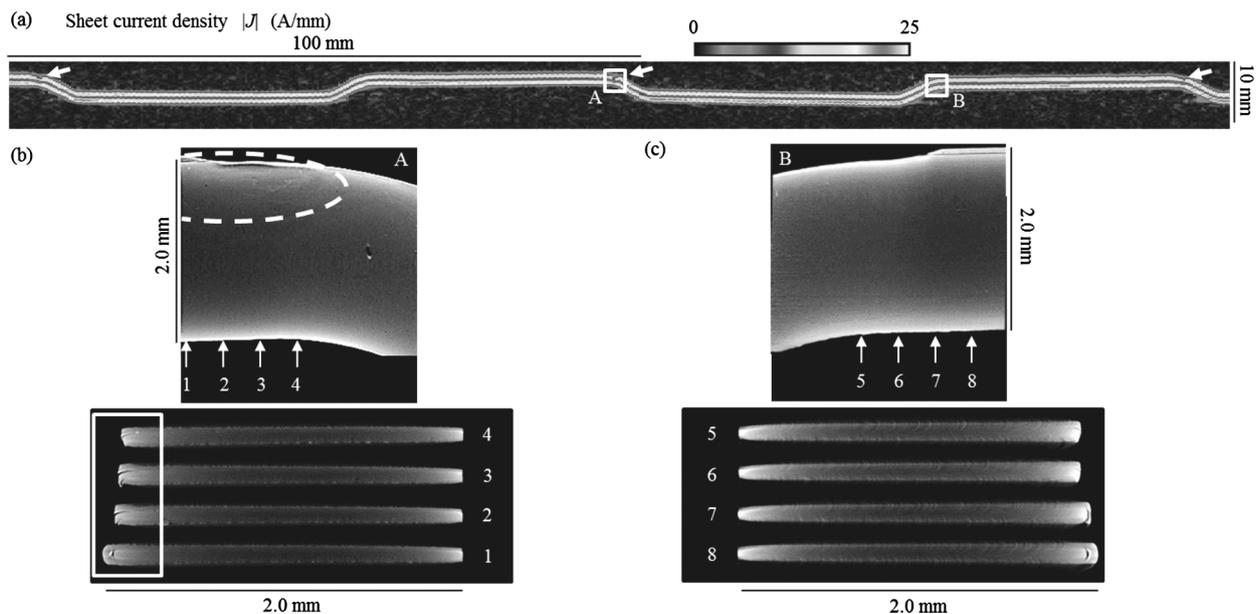


Fig. 1 Hybrid microscopy for a Roebel strand: (a) Two-dimensional distribution of sheet current density where arrows indicate periodic defects and the squares A and B are the area observed by X-ray CT, (b) X-ray tomograms of top view of REBCO layer interface and side views at position A (local J_c deterioration), and (c) X-ray tomograms at position B (free from deterioration).

超電導非接触給電に向けた Y 系高温超電導線材の kHz 帯における交流損失特性

AC Loss Characteristics in KiloHertz Band of a High-Temperature Superconductor Wire for a Wireless Power Transmission

井上 良太, 宮城 大輔, 津田 理, 松木 英敏(東北大)
INOUE Ryota, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto, MATSUKI Hidetoshi (Tohoku Univ.)
E-mail: ryota.inoue.q3@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年, 大容量非接触給電, 銅の送受信コイルを用いる場合は, 内部抵抗による損失が顕著となるため, 高い伝送効率の実現は困難である。このため, 我々は, Y 系高温超電導線材で構成されるコイルを 10kHz 未満の非接触給電システムに適用することを考えている[1]。しかし, 非接触給電システムの動作周波数は kHz 帯であるため, 商用周波数では支配的となる超電導層のヒステリシス損だけでなく, 安定化層の渦電流損も伝送効率に影響を及ぼす可能性がある。そこで, 本研究では, まず, 安定化層の無い線材を用いて, kHz 帯における超電導層の通電損失を測定した。また, 安定化層のある線材と無い線材を用いてコイルを作製し, それぞれの交流損失を測定することで, kHz 帯における超電導層の磁化損失と Y 系コイルの全交流損失を評価した。

2. 測定方法

測定に使用した線材および HTS コイルの諸元をそれぞれ Table 1 と Table 2 に示す。ここで, Sample I は, 安定化層の無い線材であり, Sample II は, 安定化層のある線材である。また, Sample A は, Sample I を用いて作製したコイルであり, Sample B は, Sample II を用いて作製したコイルである。なお, 線材の電圧タップ間は, 125mm である。線材の通電損失は, スパイラル電圧リードループ法[2]を用いて測定し, HTS コイルの交流損失は, 誘導電圧を打ち消すキャンセルコイルを用いて測定したコイル電圧と電流より算出した。なお, 各実験は, 液体窒素(77K)に浸した状態で行った。

3. 測定結果および考察

Fig.1 に安定化層の無い線材(Sample I)における 1 サイクルあたりの通電損失の周波数依存性を示す。Fig.1 より, kHz 帯における 1 サイクルあたりの通電損失は, 周波数の大きさに依存せず, ほぼ一定となることがわかった。Fig.2 に, 安定化層の無い線材で構成されたコイル(Sample A)および安定化層のある線材で構成されたコイル(Sample B)の 1 サイクルあたりの交流損失の周波数依存性を示す。Fig.2 より, Sample A のコイルの交流損失は, 電流が小さい場合は, 周波数の増加に対して減少するものの, 電流が増加するにつれて, 周波数の増加に対する交流損失の減少率が低下した。以上より, kHz 帯における超電導層の磁化損失は, 特に, 電流が小さい場合に, 周波数の増加に対して減少することがわかった。これに対して, 一般的には, 安定性の観点から, 安定化層のある線材が, 非接触給電用コイル線材として採用される。この安定化層のある線材で構成された Sample B のコイルでは, 約 5kHz 以上の周波数領域において, 周波数の増加に対して 1 サイクルあたりの交流損失が増加することが確認された。これは, 約 5kHz 以上の周波数領域では, 周波数が増加するにつれて, 超電導層のヒステリシス損よりも, 安定化層の渦電流損が支配的になるためと考えられる。Y系高温超電導線材を非接触給電システム用コイルに適用する場合, 動作周波数は 10kHz 未満となり, 安定化層の渦電流損を無視できなくなるため, 今後は, 超電導層の幅だけでなく, 安定化層の厚さが交流損失に与える影響についても検討する予定である。

Table 1. Specifications of HTS wire.

Sample	I	II
Type	GdBCO	GdBCO
Superconducting layer thickness [μm]	1.0	2.0
Copper stabilizer thickness [μm]	-	75.0
Silver overlayer thickness [μm]	1.5 (Ag coating)	6.0
Hastelloy substrate thickness [μm]	60.0	75.0
Tape width [mm]	4.0	5.0
I_c ($1\mu\text{V}/\text{cm}$ at 0T, 77K) [A]	118	314
n value ($1\mu\text{V}/\text{cm}$ at 0T, 77K)	35	33

Table 2. Specifications of HTS coils.

Sample	A (Sample I)	B (Sample II)
Coil Radius [mm]	45	45
Coil Height [mm]	10	10
Number of Turns	10	10
Self-inductance [μH]	20.7	19.7

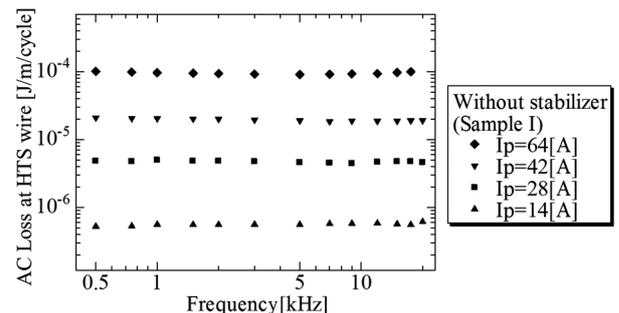


Fig.1 Experimental results of AC losses in the HTS wire as a function of frequency.

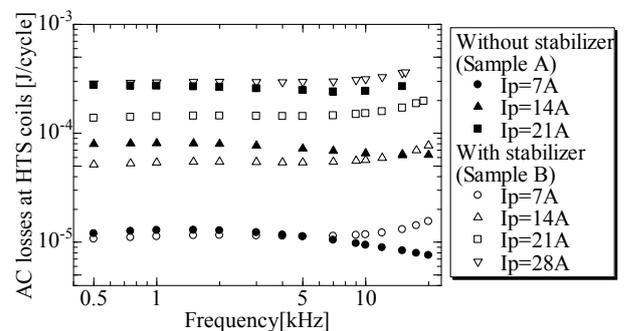


Fig.2 Experimental results of AC losses in the HTS coils as a function of frequency.

参考文献

- [1] R. Inoue et al. : *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.27, No.1(2017) 5400106
- [2] O. Tsukamoto et al. : *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.11, No.1(2001)

様々な電磁環境下における積層導体で巻線された高温超伝導コイルの 交流損失測定

AC loss measurement of HTS coils wound by stacked conductors under various magnetic field conditions

平山 齊, 川畑 秋馬 (鹿児島大)

HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

E-mail: hirayama@eee.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導体を用いた SMES や電力ケーブル、変圧器などの電力機器への応用研究が行われており、今後さらにその応用分野は広がるものと思われる。本研究室では搬送用・輸送用などの産業応用機器として注目されているリニアスイッチトリラクタンスモータ (LSRM) の励磁巻線に超伝導コイルを使用し、高性能化を目指した高温超伝導リニアスイッチトリラクタンスモータ (HTS-LSRM) を提案している。HTS-LSRM を始め、超伝導電力機器の開発においては、超伝導コイルで発生する交流損失を定量的に把握する必要がある。

そこで本研究では、積層導体で巻線された高温超伝導コイルの交流損失特性を明らかにするために、Bi-2223 サンプルコイルを用いて、様々な電磁環境下での交流損失を測定した。まず、正弦波形の外部磁界をサンプルコイルに印加したときの交流損失の磁界振幅依存性および周波数依存性を測定し、磁化損失と結合損失について評価した。次に、パワエレ装置駆動による方形波形の外部磁界中での測定も行ったので、それらの結果について報告する。

2. 実験方法

交流損失の測定は液体窒素蒸発法を用いて行った。Fig. 1 に本実験で用いた蒸発法による交流損失測定装置の概略図を示す。測定値を校正するために、ヒータ入熱に対するガス流量の測定値から熱量を換算し、その結果から最小二乗法を用いて校正近似的を算出した。交流損失の測定で得られた測定値に校正近似的を適用することで窒素ガス蒸発量から損失値を求めた。この校正試験は交流損失の測定毎に行った。

試料コイルは、内径 40mm、高さ 16.8mm、層数 11、総ターン数 33 のソレノイドコイルを 2 つ積み重ねたものである。このコイルは、断面形状 4.1mm×0.21mm、臨界電流 116A@77K, s.f. の Bi-2223 テープ線材を 2 枚積層した導体で巻線したものであり、線材間は絶縁を施してある。試料コイルへの外部磁界印加用マグネットに通電する電流波形は、正弦波電流の場合と、パワエレ装置駆動による方形波電流である。Fig. 2 は、パワエレ装置を用いた場合の実験回路である。

3. 測定結果

試料コイルに正弦波形の磁界を印加したときの交流損失の測定結果を Fig. 3 に示す。黒丸のプロットは、試料コイルの端部は開放して、周波数 100 Hz、マグネット通電電流を 5 A~20 A の範囲で変化させたときの測定値、実線は Bean-London モデルに基づいて算出した磁化損失の計算値である。測定値と計算値はよく一致していることから交流損失を精度よく測定できていることがわかる。一方、白抜きのプロットは試料コイルの端部を短絡したときの測定結果であり、2枚の線材とコイル両端部分の接続部で形成される閉ループに流れる遮蔽電流により、接続部で発生する付加的な損失の分だけ交流損失が増加している。

Fig. 4 は試料コイルに方形波形の磁界を印加したときの交流損失の結果である。印加磁界波形以外は、Fig. 3 に示す条件と同様である。試料コイルの端部を短絡した場合、同様に交流損失は増加しているが、詳細については、当日報告する。

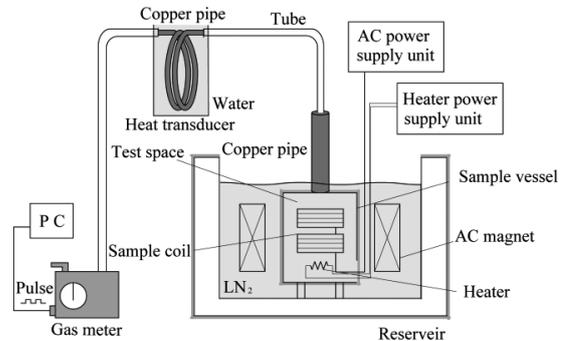


Fig. 1 Experimental apparatus for measuring AC losses using the nitrogen boil-off method.

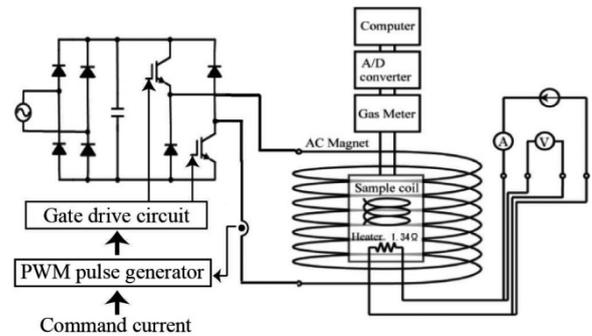


Fig. 2. Experimental circuit for measuring AC losses.

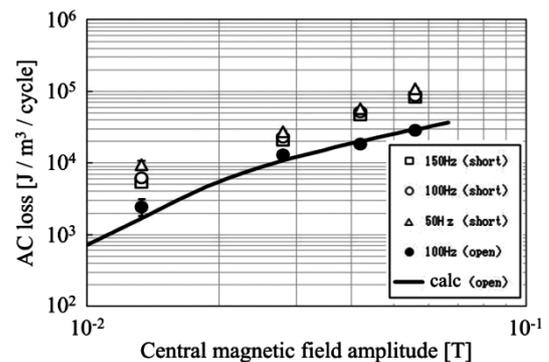


Fig. 3. Measured results of AC loss in case of sinusoidal field.

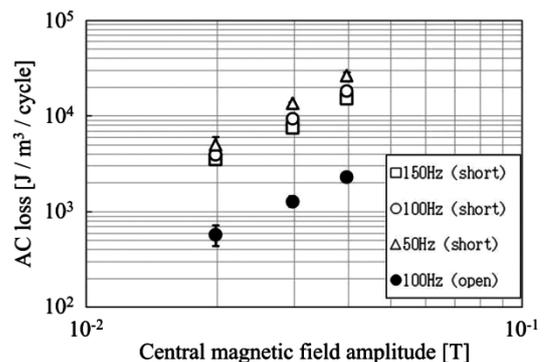


Fig. 4. Measured results of AC loss in case of square-wave field.

NbTi/YBCO ハイブリッド線材のクエンチ検出性能向上の研究

Investigation on the improvement of the quench detection performance of the NbTi/YBCO hybrid tape

泊瀬川 晋, 伊藤 悟, 橋爪 秀利 (東北大)

HASEGAWA Shin, ITO Satoshi, HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: shase@karma.qse.tohoku.ac.jp

1. はじめに

現在, 超伝導線材のクエンチの検出方法では, 線材の電圧を直接計測する方法が一般的であるが, 高温超伝導 (HTS) 線材を対象とした場合, 検出電圧が微小であるという課題がある^[1]。先行研究では, 新たなクエンチ検出手法として, 電流輸送用の RE 系 HTS 線材と, クエンチ検出用の低温超伝導体 (LTS) から成る, 極低温高磁場環境でも使用可能な, LTS/HTS ハイブリッドテープ線材を提案している^[2]。YBCO 線材と NbTi 線材を組み合わせた NbTi/YBCO ハイブリッド線材を用いた実験の結果, YBCO 線材クエンチ時に, NbTi 線材で電圧の発生が確認されたが, 検出電圧は微小であった。この要因として, 銅安定化材の抵抗が小さく, NbTi 線材内の発熱密度および電圧降下が小さくなったことが考えられた^[3]。そこで本研究では, 安定化材の除去または高抵抗の CuNi 安定化材の使用により, NbTi 線材内の発熱密度および電圧降下を増大させることを提案し, これによる NbTi/YBCO ハイブリッド線材のクエンチ検出性能向上の可能性を数値解析で検証した。

2. 解析体系

解析モデルを Fig. 1 に示す。長さ 100 mm (x 方向) の YBCO 線材の上に, エポキシで覆われた NbTi 線材を配置したハイブリッド線材を想定し, 4.2 K の液体ヘリウム冷却を仮定した。また, YBCO 線材でのクエンチ模擬のため, YBCO 中の x 方向の中心 1 mm の領域での臨界電流密度を 0 A/m^2 とした。本解析では, 熱伝導解析と静電ポテンシャル解析の連成解析を行った。温度分布は 3 次元熱伝導方程式から, 静電ポテンシャル分布は, YBCO 線材中では, z 方向に一樣と仮定し 2 次元の Poisson 方程式から, 有限体積法を用いて求めた。ここで, YBCO 中の電流密度を臨界電流密度に一致させるため, 橋爪らの提案した手法^[4]を計算に用いた。また, NbTi 線材中では電場を x 方向に積分することで静電ポテンシャル分布を 1 次元的に求め, エポキシ中は電流が存在しないと仮定した。以上の解析を, NbTi 線材として純粋な NbTi 線を使用した場合 (条件 1, 2) と安定化材が CuNi の NbTi 線材を使用した場合 (条件 3) を対象に実施した。各解析条件を Table 1 に示す。

3. 解析結果

Fig. 2 に条件 1 での YBCO 中の最大温度と YBCO 線材, NbTi 線材での検出電圧の時間変化を示す。YBCO 中で急激な温度上昇が生じる前に, NbTi 線材において YBCO 線材よりも高い電圧が検出できるという結果となった。同様の結果は条件 2, 3 でも得られ, これらは, NbTi 線材の常伝導抵抗が大きくなり, 線材内部の発熱密度と電圧降下が大きくなったことによると考えられる。Table 2 に, 各条件での YBCO 線材中の最大温度が 300 K に到達した際の, NbTi 線材および YBCO 線材中の常伝導領域の長さを示す。NbTi 単線を用いた条件 1, 2 の場合では, NbTi 線材中の全領域が常伝導領域となったことが分かる。よって, より長い NbTi 線材を用いることで, さらに常伝導伝播が生じ, 検出電圧が増加すると期待される。

4. まとめ

本研究では, NbTi 線材の安定化材の調整による, NbTi/YBCO ハイブリッド線材のクエンチ検出性能向上可

能性を, 数値解析で検証した。その結果, NbTi 線材の安定化材の除去または高抵抗化により, ハイブリッド線材のクエンチ検出性能が向上する可能性が示された。解析条件および結果の詳細は発表当日に報告する。

参考文献

1. Wang X, et al. 2009 *Supercond. Sci. Technol.* **22** 085005
2. Hasegawa S, et al. 2016 *Abstracts of CSSJ Conference* **93** p.69
3. Hasegawa S, et al. 2016 *Abstracts of 1st Asian ICMC-CSSJ 50th Anniversary Conference* p.6
4. Hashizume H, et al. 1992 *Int. J. Appl. Electromagn. Mater.* **3** pp.205-213

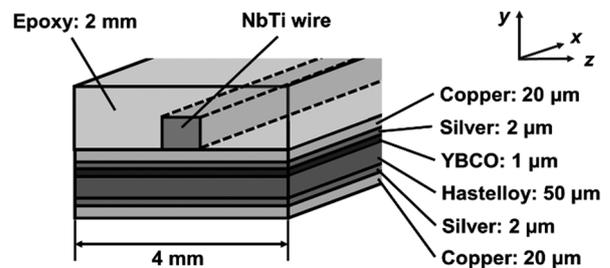


Fig. 1 Three-dimensional geometry of a LTS/REBCO Hybrid Tape

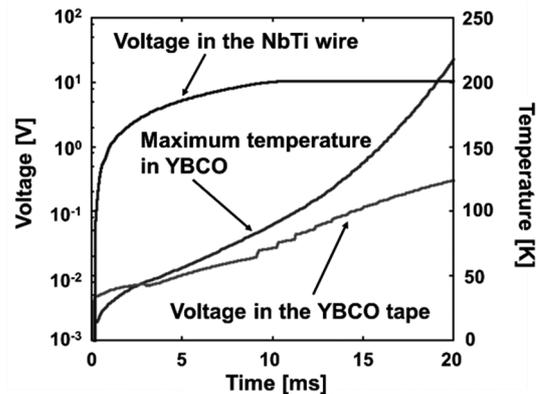


Fig. 2 Transient Change of Voltage in the NbTi wire and the YBCO tape and Maximum Temperature in YBCO (Case 1)

Table 1 Conditions for the NbTi Wire in the Simulation

Case	1	2	3
Cross-sectional Area $\times 10^{-4} [\text{mm}^2]$	180	3.3	710 (CuNi:NbTi=3:1)
Critical Current [A] (4.2 K, Self-field)	180	3.3	180
Monitoring Current [A]	3.0	0.3	3.0

Table 2 Normal Zone in the NbTi wire and the YBCO tape

Case	1	2	3
Normal zone in the NbTi wire [mm]	100	100	48
Normal zone in the YBCO tape [mm]	17	12	8.8

精密金属組成制御による RE 系超伝導体の超伝導特性改善

Improvement of superconducting properties of RE-based superconductors by precise control of cation compositions

下山 淳一, 齊藤 陽大, 西森哲太郎, 元木 貴則 (青学大)

SHIMOYAMA Jun-ichi, SAITO Yota, NISHIMORI Tetsutaro, MOTOKI Takanori (Aoyama Gakuin Univ.)

E-mail: shimo@phys.aoyama.ac.jp

1. はじめに

我々は、RE123($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$)、RE247($\text{RE}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_y$)など、RE-Ba-Cu-O 系の焼結体の研究を通じて、新しいタイプの高温超伝導多結晶材料の創出を目指している。特に研究例が極めて少ない RE247 においては相生成条件が高酸素分圧雰囲気下であるため CuO 鎖面の酸素サイトの占有率が相対的に高く、RE123 よりも Ba サイトへの RE の自発的な部分置換が起こりやすい。つまり理想的な RE247 相本来の超伝導特性はこれまでに評価できていない可能性が高く、整数比組成への金属組成制御は興味深い課題である。Y123 では、微細仮焼粉末の使用、高い圧力下での成型、比較的低温における還元雰囲気下での焼成やポストアニール、平衡酸素量の増加や Ca ドープによるキャリアのオーバードープ状態の実現が、無配向焼結体の粒間 J_c や不可逆磁場の改善に有効であることを報告してきた。しかし Y247 多結晶体に対してはこれらの戦略の効果はよくわかっていない。なかでも、Ca ドープはキャリアドープだけでなく、Y247 相の生成を促進し[1]、さらに CuO 鎖面の絶対酸素量を減らすことから、Ba サイトへの Y の部分置換を抑制する効果も期待できる。

一方、Nd など中軽希土類の RE123 や RE247 に対しては Y123 よりも高 T_c 材料となりうる魅力があるが、RE が Ba サイトに置換し、同時に BaCuO_2 などの不純物相が生成するため特に粒間の J_c が低下しやすい。また、RE247 においては CuO 鎖面の酸素占有率を小さくする還元雰囲気下でのポストアニールは RE123 相への変化を起こす場合があり、この方法での金属組成制御は容易でない。

以上の背景のもと、本研究では RE123、RE247 において、RE の Ba サイト置換量をできるだけ低減することを目指し、新たな作製プロセスを検討している。今回は酸素量固定焼成法による焼結体合成および得られた試料の超伝導特性を中心に報告する。

2. 実験方法

RE123、RE247 の焼結体は RE_2O_3 、 BaCO_3 または BaO_2 、CuO または Cu_2O を出発原料とし、様々な前駆体となる酸化物を作製した後、石英封管内での焼成により目的相の生成を試みた。例えば、Nd123 では、 Nd_2CuO_4 、 $\text{Ba}_4\text{Cu}_3\text{O}_7$ (仕込組成)、 Cu_2O を前駆体とし、これらのモル比 1:1:1 の混合物が酸素量の変化なく反応すれば、 $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ が得られる。また、RE247 は $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$ と CuO のモル比 2:1 の混合物の反応により合成する。これらの反応は試料をアルミナのタンマン管に入れ石英封管内で行うもので、

試料重量は 0.3~2 g、石英封管内のガス体積は 2~4 cm^3 で、反応中の試料およびガス空間中の酸素量の和は一定である。焼成後の試料は最後に、酸素気流中で 400°C から 250°C まで 12 時間以上かけて徐冷した。試料の構成相は粉末 XRD、微細組織は SEM、磁化特性は SQUID 磁束計により調べた。

3. 結果と考察

石英封管内で $\text{RE}_2\text{CuO}_4 + 4\text{BaCuO}_2 + (\text{CuO}, \text{Cu}_2\text{O})$ の混合物を焼成することにより La123、Nd123 の合成が可能であることを見出した。つまり、CuO と Cu_2O の割合によって RE123 相生成時の絶対酸素量が固定でき、Ba サイトへの RE の自発的置換量を酸素量の関数として定量的に調べることやその低減の指針が立てられる。また、CuO や Cu_2O を増やして仕込組成を RE:Ba:Cu = 1:2:3.5 とした場合には、RE247 生成前の RE123 前駆体の金属組成が制御できることを意味する。

一方、Y123 と CuO の混合物からの Y247 の合成においては Fig. 1 に示すように 960~1000°C の焼成で Y247 の生成が非常に速やかに進行することがわかった。さらに、焼成温度での保持時間ゼロ、つまり昇降温の過程だけでも Y247 が主相となった。高酸素分圧雰囲気下での焼成であっても短時間の反応においては Y の Ba サイトへの置換が進行せず、90 K 級の T_c が保たれる。また、Y247 焼結体は、Y123 焼結体と比べて磁化ヒステリシスが大きく、第 2 ピーク効果を示すことがわかった。また、磁化ヒステリシスや第 2 ピークは Y サイトに Ca ドープした試料のほうが大きい傾向が認められた。これらは、RE247 における臨界電流特性決定因子が RE123 とは異なること、より高いポテンシャルを有することを示唆する結果である。

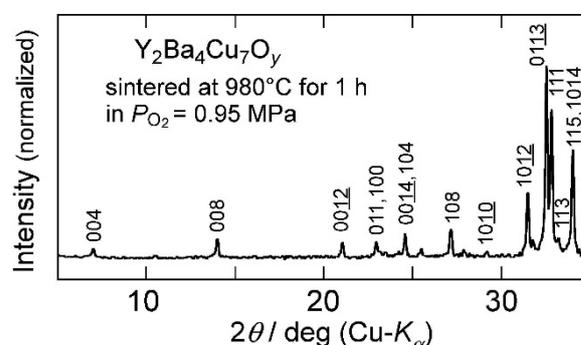


Fig. 1 Powder XRD pattern of Y247 synthesized at 980°C for 1 h in $P_{\text{O}_2} = 0.95$ MPa from Y123 + 0.5CuO.

参考文献

- [1] J. Shimoyama *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 93 (2016) p.20.

Ba 過剰な仕込組成からの Gd123 溶融凝固バルクの育成と超伝導特性

Synthesis of Gd123 melt-solidified bulks from Ba-rich composition and their superconducting properties.

松丸 周佑, 佐藤 巧望, 元木 貴則, 下山 淳一 (青学大); 淡路 智 (東北大)
 MATSUMARU Shusuke, SATO Takumi, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama gakuin Univ.);
 AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)
 E-mail: c5617058@aoyama.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (RE123)溶融凝固バルクは液体窒素温度 77 K を超える高い臨界温度 T_c を有し、高磁場下においても高い J_c 特性を示すことから強力超伝導磁石としての応用が期待されている。RE123 溶融凝固バルクでは RE³⁺ が Ba²⁺ サイトを部分置換する RE/Ba 固溶が生じやすく、固溶量の多い領域では超伝導特性が本質的に劣化する。RE/Ba 固溶の抑制および制御方法として、溶融凝固前の BaO₂ 添加[1]、還元雰囲気下でのバルク育成[2]、RE 混合[3]などが知られている。本研究では、Gd123 溶融凝固バルクの超伝導特性の改善を目指し、通常の RE123 溶融凝固バルクの全体組成が乗る RE123-RE211 タイラインから外れ、Ba 過剰となる仕込組成からの育成により Gd/Ba 固溶の抑制を試みた。

2. 実験方法

原料粉末となる Gd123 と Gd211 は低温固相反応により同時合成した。Ba 過剰な仕込組成となるよう出発原料をモル比で Gd₂O₃ : BaCO₃ : CuO = 1.3 : 3.4 + 2x : 4.8 (x = 0 - 0.30) となるよう秤量、混合後、空气中で 890°C、12 時間で 2 回焼成し、Gd123 と Gd211 のモル比が 7 : 3 となる原料粉末を作製した。得られた粉末に Ag₂O 10 wt%, Pt 0.1 wt% を添加し、混合した粉末を一軸プレス(100 MPa)により 20 mmφ × 8 mm^t のペレットに成型した。Nd123 単結晶を種結晶としてペレットの上面中央に置き、底面加熱方式の電気炉を用いて、空气中で溶融凝固を行い、シングルドメインの Gd123 溶融凝固バルクを得た。作製したバルクを板状に切り出し、350°C まで酸素アニールを十分に行った後、1.5 mm × 1.5 mm × 1 mm^t の小片試料に切り出し、走査型電子顕微鏡により微細組織を観察し、SQUID 磁束計を用いた磁化測定より超伝導特性を、粉末 XRD パターンの解析より格子定数を評価した。

3. 結果と考察

Ba 過剰量 $x = 0 - 0.30$ の範囲でシングルドメインの Gd123 溶融凝固バルクが得られた。Fig. 1 に種結晶下方 2 mm ($L_c = 2$ mm) の場所から切り出した小片試料の研磨面の 2 次電子像の比較から、Gd123 溶融凝固バルクの微細組織には Ba 過剰にすることによる Gd211 粒子の大きさや体積分率などの明瞭な違いは見られなかった。一方、Ba 過剰にすることで a -growth 領域の試料において T_c が 1 K 程度上昇した。さらに、 c -growth 領域、 a -growth 領域とも $x = 0.20$ までは J_c - H 特性や Fig. 2 に示すピンニング力密度 F_p が x の増加とともに系統的に改善し、 $x = 0.20$ で $J_c(77\text{ K}, 2\text{ T}) \sim 6 \times 10^4\text{ A cm}^{-2}$ に達した。Ba 過剰組成とすることによる J_c - H 特性の改善は、

a -growth 領域のほうが顕著で、さらに、より低温になるに従い J_c が大きく向上することがわかった。これは、母相である Gd123 の凝縮エネルギー密度の増大を示唆する結果で、仕込組成を Ba 過剰にすることで RE/Ba 固溶が抑制されたことの傍証と考えられる。

当日は、Ba 過剰量 x と格子定数の関係やより低温の 300°C で酸素アニールした試料の超伝導特性についても報告する。

参考文献

- [1] A. Hu *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **17** (2004) 545 - 548.
 [2] S.I. Yoo *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** (1994) L1000 - L1003.
 [3] Y. Setoyama *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **28** (2015) 015014.

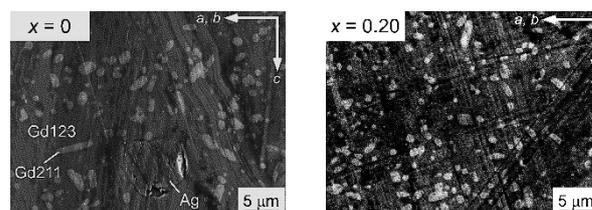


Fig. 1 Secondary electron images of the Gd123 bulks with $x = 0$ (left) and $x = 0.20$ (right).

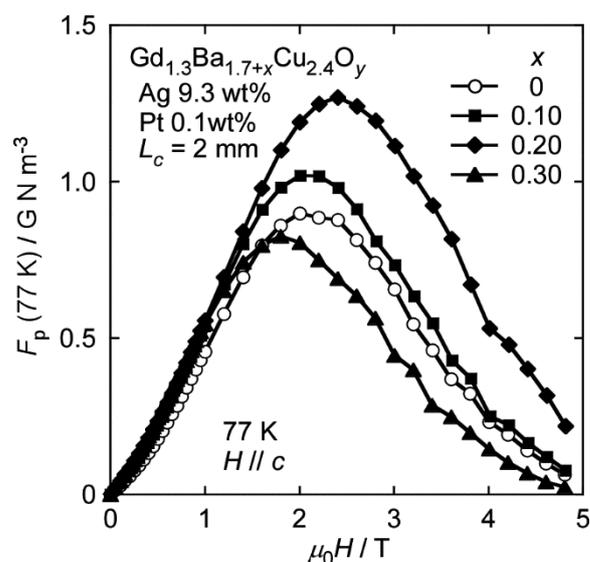


Fig. 2 Magnetic field dependence of F_p at 77 K of the Ba-rich Gd123 melt-solidified bulks with various levels of excess Ba, x .

(Y, RE)211 を用いた YBaCuO 溶融凝固バルクの捕捉磁場特性と微細組織観察

Trapped field properties and microstructures in YBaCuO melt-solidified bulks using (Y, RE)211

高橋 勇矢, 内藤 智之, 藤代 博之 (岩手大学)

TAKAHASHI Yuya, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.)

E-mail: t2216019@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

REBaCuO 超伝導バルクは高い転移温度と捕捉磁場を示すため、擬似永久磁石として磁気浮上など多岐に渡る応用開発が期待されている。さらに、REBaCuO 超伝導バルクにおいて、RE の Ba サイトへの固溶 (RE/Ba 固溶) は超伝導特性を低下させるが、低濃度領域において磁場誘起型ピン止め点となることが知られている[1]。先行研究において、3 種類の RE を用いた NEG ((Nd_{0.33}Eu_{0.33}Gd_{0.33})BaCuO) バルクが 77 K で約 12T の不可逆磁場を示し、その起源は RE 混合によって形成されるラメラ構造がピン止め点として働くと考えられている[2]。近年、様々な RE を 2 種類組み合わせ合わせた RE 混合バルクにおいて、磁束ピン止め特性が向上することや RE/Ba 固溶を制御できることが報告された[3]。このように、複数の RE 混合は、改善に有効であるが、RE 混合のメカニズムは十分に理解されていない。本研究では、Y211 と RE211 (RE=Gd, Dy) を様々な割合で混合した YBaCuO 溶融凝固バルクを作製して、捕捉磁場の温度依存性や微細組織観察から RE 混合が磁束ピン止め特性に与える影響を明らかにする。

2. 実験方法

RE123 粉末と RE211 粉末をモル比 10:3 で混合し、CeO₂ を RE211 微細分散のため 0.5 wt% 添加した。RE211 は Y211 と Gd211、または Dy211 をモル比 3:0、2:1、1:2、0:3 で混合したものを用いた。その後、20 mm φ のペレット状に圧粉成形した。種結晶に NdBaCuO を用いて溶融凝固を行った。成長したバルクは 430°C–450°C の酸素中で 240 h アニールされた。その後、ホール素子によって捕捉磁場の温度依存性、SQUID 磁束計によって 30 K、50 K、77 K における磁化を測定した。さらに、SEM による微細組織観察、EDX による定量分析を行った。

3. 実験結果

Fig.1 に(Y, Gd)BaCuO [2 : 1] (Y211:Gd211=2:1) の反射電子像を示す。反射電子像から、RE211 が白と黒の 2 色に分けられていることが確認できる。定量分析から、白い相は Y:Gd = 0.79:0.21、黒い相は Y:Gd=0.85:0.15 であった。さらに、包晶分解時に存在した RE211 の周囲に、異なる組成の RE211 が包晶成長していることを確認した。このことから、RE 混合は RE211 の粗大化に影響を及ぼすと考えられる。

Fig.2 に(Y, Gd)BaCuO [2 : 1]、YBaCuO 及び GdBaCuO における捕捉磁場の温度依存性を示す。(Y, Gd)BaCuO [2 : 1] の低温における捕捉磁場が YBaCuO に比べて高く、GdBaCuO に近いことが分かる。YBaCuO よりも(Y, Gd)BaCuO [2 : 1] の低温における捕捉磁場特性が高い理由は、Gd/Ba 固溶領域が磁場誘起型のピン止め点として働いたからであると考えられる。従って、RE211 の混合比や RE 元素を変えることで、RE/Ba 固溶を制御して捕捉磁場特性を更に向上させることが出来る可能性があると考えられる。

講演当日は、Y とのイオン半径が Gd よりも近い Dy を混合した試料における、捕捉磁場の温度依存性や微細組織観察等を併せて YBaCuO 溶融凝固バルクの RE 混合効果について議論する予定である。

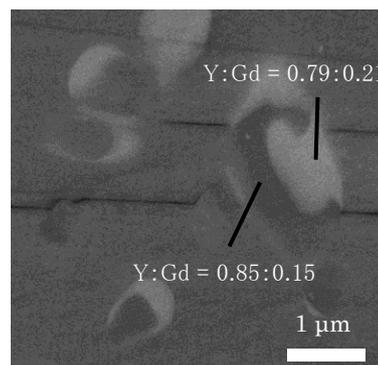


Fig.1 Backscattered electron image of (Y, Gd)BaCuO[2:1].

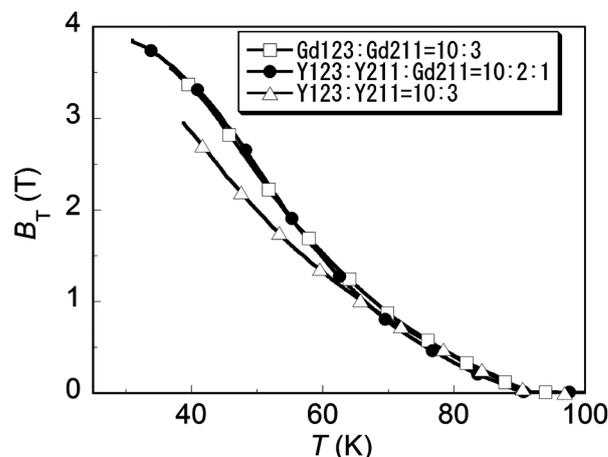


Fig.2 Temperature dependence of trapped field for the GdBaCuO, (Y, Gd)BaCuO[2:1] and YBaCuO bulks.

参考文献

1. M. Murakami et al.: Supercond. Sci. Technol. **9** (1996) 1015
2. M. Muralidhar et al.: Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 237001
3. Y. Setoyama et al.: Supercond. Sci. Technol. **28** (2015) 015014

Y123 バルクの臨界電流密度特性に及ぼすナノダイヤモンド添加の効果

Effect of nanodiamond addition on critical current densities in Y123 bulk superconductors

井上 和朗, 藤井 寛祐, MIRYALA Muralidhar, 村上 雅人(芝浦工大)
INOUE Kazuo, FUJII Hirosuke, MIRYALA Muralidhar, MURAKAMI Masato (SIT)
E-mail: k-inoue@sic.shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

YBa₂Cu₃O₇ (Y123)バルク体は、高い臨界電流密度(J_c)、大きな捕捉磁場及び高い磁気浮上性能を有するため、小型超伝導マグネットシステムや攪拌機等の浮上回転装置への応用が期待されている。バルク超伝導体の特性向上には、磁束の運動を抑制するピン止めセンターの導入が必要である。ピン止めセンターとしては、一般に常伝導粒子が有効とされている。ピン止め効果は粒子径に依存することが知られており、微細粒子の分散によって J_c は大きく向上する。特にナノスケールのピン止めセンターの導入により、 J_c の飛躍的な増大が報告されている[1]。我々は、新規のナノサイズのピン止めセンターとして、ナノカーボン系に注目した。そして、カーボンナノチューブを添加したバルク体を作製したところ、100nm 程度の針状の粒子が母相内に分布していることを観察し、 J_c が増大することを報告した[2]。同じナノカーボン系であるナノダイヤモンド(ND)もまた、有効なピン止めセンターとなる可能性があり、高い J_c を有するバルク超伝導体の作製が期待できる。

本研究では、ND を添加したバルク体を熔融法で作製し、ナノサイズのピン止めセンターとしての有効性を調べることで、Y123 バルク超伝導体の J_c 向上を図ることを目的とした。

2. 実験方法

Y123 と Y₂BaCuO₅ (Y211)をモル比 10:4 となるように秤量した後、CeO₂を1wt%添加し、湿式混練法を用いて混合した。さらに、ND を 0~0.6wt%添加し、凝集状態の ND を分散させるためにアセトン溶媒として超音波攪拌器にて混合した。次に混合粉を一軸等方プレス機により直径 20mm の前駆体にペレット成型した。結晶成長は、Nd123 を種結晶として、等温成長法により行った。995°Cにおいて25h 結晶成長させた。その後、超伝導化するために、400°Cにて100hの酸素アニール処理を施した。作製したバルク超伝導体の組織観察は、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて行った。また、SQUID 磁束計を用いて、 J_c の評価を行った。

3. 結果と考察

Fig. 1 に ND を 0.4wt%添加した Y123 バルク超伝導体の熔融成長後の SEM 像を示す。Fig. 1(a)において、丸い形状をした 500 nm オーダーの粒子が Y211 である。また、より微細な粒子が多数、母相内に分散しており、密に分布している領域と、濃度の低い領域が共存している。

観察倍率を上げて、微細粒子を観察した SEM 像を Fig.1(b)に示す。長さが数 10nm、直径 20nm 程度の細長い粒子が分布しており、ND 添加試料のみで観察されることから、ND に由来する粒子と考えられる。また、ND の添加量を増加させると、微細粒子の濃度が高くなる傾向がみられた。

Fig. 2 に ND を 0.2、0.4 及び 0.6wt%添加した試料と無添加試料の 77K における J_c の磁場依存性を示す。ND 添加によって、 J_c が顕著に増加することが分かる。

特に 0.4wt%添加した試料では、無添加試料に比べて、自己磁場下において J_c が 1.5 倍程度向上し、約 80000A/cm²を示した。これは、Y123 母相中で微細分散している ND 由来の粒子がピン止めセンターとして有効に作用し、 J_c が向上したものと推測される。ただし、ND 添加量をさらに 0.6wt%まで増加させると、 J_c の低下がみとめられた。

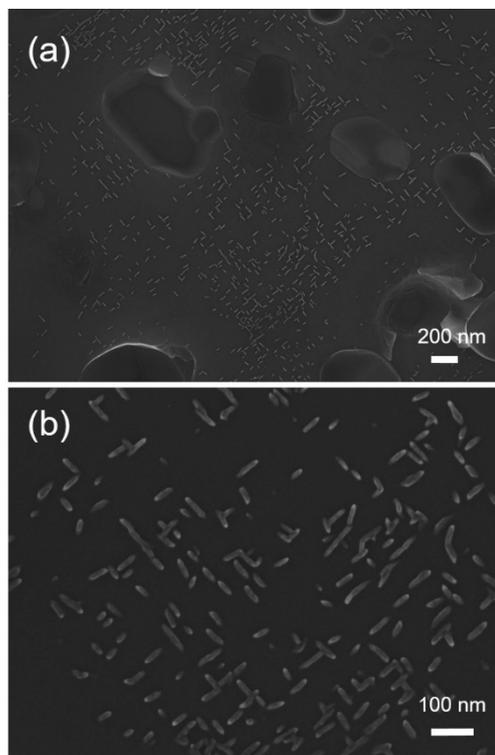


Fig. 1. SEM micrographs for melt-processed Y-Ba-Cu-O with 0.4wt% ND addition.

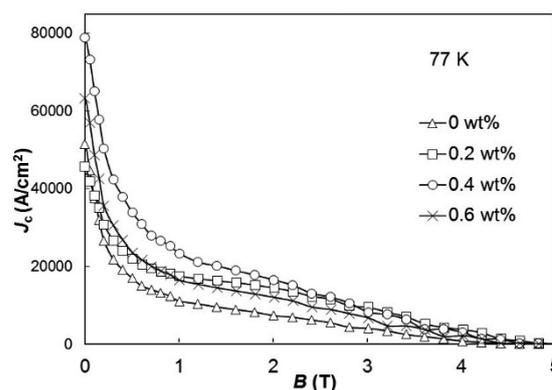


Fig. 2. Magnetic field dependence of J_c at 77 K for ND-added Y123 bulk superconductors.

参考文献

- [1] M. Muralidhar, N. Sakai, M. Jirsa, N. Koshizuka, M. Murakami: Appl. Phys. Lett. vol. 85 (2004) 3504-3506.
- [2] 井上和朗, 三宅佑弥, M. Miryala, 村上雅人: 2016 年度春季第 92 回低温工学・超伝導学会講演概要集 p. 105.